

УДК 536.24; 662.74.001.24

Кошельнік О.В. — к.т.н., доц., с.н.с. відділу водневої енергетики, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В РЕГЕНЕРАТОРАХ ПЕЧЕЙ КОКСОХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА

Розглянуто питання математичного моделювання процесів складного нестационарного теплообміну в регенеративних теплообмінниках промислових печей коксохімічного виробництва. Наведено результати обчислюва експерименту по визначенню уточнених параметричних характеристик регенератора з урахуванням його конструктивних і експлуатаційних характеристик за умов циклічності процесів нагрівання і охолодження вогнетривкої насадки. Це дозволить отримати інформацію про зміну температурного стану акумулюючої насадки регенератора, динаміку зміни температур димових газів і повітря по висоті насадки. Отримані дані можуть бути використані в системах автоматичного управління, при виборі енергоефективних режимів роботи регенераторів, оптимізації їх параметричних характеристик.

Ключові слова: коксова піч; регенеративний теплообмінник; теплові процеси; математичне моделювання.

Аналіз останніх досягнень та публікацій

Високотемпературні теплотехнічні установки (ВТУ) різного цільового призначення з системою регенеративного тепловикористання складають основу технологічних комплексів ряду енергоємних галузей промисловості. Процеси високотемпературного нагрівання й охолодження матеріалів та технологічних продуктів займають провідне місце у виробництві коксу, який є одним із основних компонентів для виплавки чавуну. В умовах зростання світових цін на енергоносії енергозбереження визначено одним із пріоритетних напрямків державної політики України в багатьох сферах промисловості [1]. Регенеративні теплообмінники плавильних печей, які використовуються при виробництві скла та нагрівальних печей коксохімічного виробництва мають невеликі габаритні розміри насадкової камери і використовують в якості гарячого теплоносія димові гази, що відходять з робочого простору печей з температурою 1100 – 1350 °С [2, 3].

У даний час, з огляду на різке подорожчання газу та електричної енергії важливою проблемою теплотехнології, що стоїть перед фахів-

цями, є удосконалення устаткування для реалізації теплових процесів в ВТУ. У коксохімічному виробництві найбільш енергоємними агрегатами є коксові печі з системою регенеративного підігріву компонентів горіння [4]. Підвищення енергоефективності роботи коксових печей пов'язано з необхідністю отримання достовірної інформації про нестационарні температурні процеси, що розвиваються в каналах теплоакumuлюючої насадки регенераторів.

Виділення невирішеної частини загальної проблеми

Складовою частиною теплотехнологічних реакторів коксохімічного виробництва є регенеративні теплообмінники з вогнетривкою насадкою, які застосовуються для підігріву повітря горіння або низькокалорійного газу шляхом утилізації теплоти димових газів, що відходять з робочої зони технологічних агрегатів [2, 3]. Одним з напрямків підвищення енергоефективності роботи регенераторів коксових печей є удосконалення конструктивних параметрів і режимів їх роботи, що безпосередньо пов'язано з аналізом даних про нестационарні температурні процеси в каналах теплоакumuлюючої насадки.

Відзначимо, що раніше дослідженням теплової роботи регенераторів коксових печей приділялося недостатньо уваги, що було пов'язано з низькою вартістю палива та вогнетривких матеріалів та складністю для дослідження нестационарних теплообмінних процесів. Зокрема, в роботах [3, 5, 6] відзначено, що у більшості випадків для розрахунку регенераторів коксових печей досі застосовується спрощена методика Е.М. Гольдфарба та І.Д. Семікіна. При цьому регенератор розглядається як рекуператор з відповідними припущеннями. В основі методики лежить визначення середніх значень коефіцієнтів теплопередачі за період роботи регенератора, що не дозволяє прогнозувати динаміку змін температур газу і повітря з урахуванням залежності теплофізичних властивостей теплоносіїв і вогнетривів насадки від температури.

У цьому випадку найбільш доцільним для визначення температурних полів, умов теплообміну і інших теплових параметрів регенераторів є використання методів математичного моделювання і ідентифікації. Такий підхід потребує створення уточнених математичних моделей теплообміну з урахуванням конструктивних особливостей регенераторів і технологічного зв'язку теплообмінників з роботою коксових печей. Ця обставина потребує створення і реалізації математичних моделей з урахуванням конструктивних особливостей регенераторів коксових печей і технологічного зв'язку регенератора з роботою основного агрегату.

Постановка задачі

Дослідження теплових режимів ВТУ з регенеративним підігрівом компонентів горіння доцільно виконувати на основі використання системного підходу при аналізі теплових схем і процесів у ВТУ. Це дозволяє на початку дослідження не розглядаючи всі їх особливості, виділити найбільш значущі фактори, які впливають на загальні характеристики систем ВТУ.

Паливом для коксових печей є коксовий газ або суміш доменного та коксового газів. Як відомо, у коксових печах більше ніж 50 % тепла, що відходить з продуктами горіння, регенерується й повертається в опалювальну систему коксових батарей. З урахуванням економічного фактору при виборі методів дослідження і технічних засобів для дослідження теплофізичних процесів і теплових режимів регенераторів коксових печей доцільно використовувати методи математичного моделювання, які були успішно використані для дослідження параметричних характеристик регенераторів скловарних печей, які працюють в подібних температурних умовах [7].

Мета роботи полягає у науковому обґрунтуванні і розробці методологічних засад стосовно використання методів математичного моделювання процесів нестационарного теплообміну в теплоакуючих насадках регенераторів коксових печей.

Викладення основного матеріалу дослідження

Високотемпературні теплотехнологічні системи і установки широко використовуються в коксохімічному виробництві, де найбільш енергоємними агрегатами є коксові печі. Найбільш загальне уявлення щодо роботи високотемпературної теплотехнологічної установки дає її структурна схема, в якій відображаються основні зони реактора і установки та існуючі технологічні зв'язки між ними (рис. 1).

На рис. 1 прийняті такі позначки: ВД – вода; ХОВ – хімічована вода; ДГ – димові гази; КГ – коксовий газ; ПГС – парогазова суміш; ІТ – інертний теплоносіє; ПП – перегріта пара; П(ВШ) – паливо (вугільна шихта); К – кокс; ГК – гарячий кокс; ПВ – повітря.

Головним елементом ВТУ є теплотехнологічний реактор (кокова батарея), в робочій зоні якого реалізуються основні етапи технологічного процесу виробництва коксу. У зону технологічної обробки реактора подається технологічна сировина – вугілля, що коксується. Із регенератора в окрему камеру горіння кокової печі підводять компоненти горіння (паливо та повітря горіння), що використовуються для генерації теплоти, та забезпечує необхідну зміну теплового стану вихідних технологічних матеріалів. Технологією передбачається охолодження гарячого коксу в пристроях додаткового тепловикористання. В залеж-

ності від калорійності опалювального газу можуть використовуватися пара регенераторів для підігріву повітря горіння або дві пари регенераторів для підігріву як повітря горіння, так й низькокалорійного газу за рахунок використання теплового потенціалу димових газів, що відходять з камери горіння коксової батареї з високою температурою.

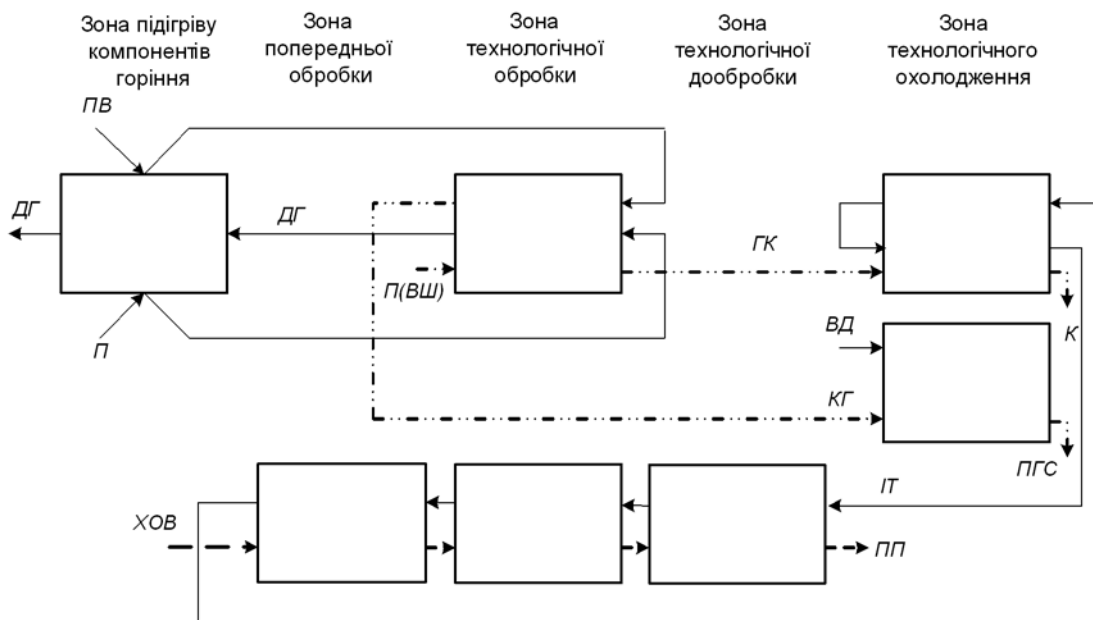


Рис. 1. Узагальнена теплова схема ВТУ коксохімічного виробництва

Коксова піч, як теплотехнічний агрегат, складається з прямокутної камери, де відбувається технологічний процес коксування вугілля, опалювальних простінок, де згоряє опалювальний газ та регенераторів для утилізації теплоти димових газів, що відходять. Піч може мати, як показано на рис. 2, дві пари регенераторів для підігріву опалювального газу та повітря горіння за рахунок теплоти димових газів, що відходять з агрегату.

В залежності від виду палива і конструктивних особливостей печей в регенераторах нагрівається тільки повітря горіння або повітря горіння і низькокалорійне паливо.

Схеми руху газів в опалювальній системі, незважаючи на розходження в конструкціях коксових печей, мають наступні загальні закономірності. Повітря горіння надходить через отвори в газоповітряних клапанах у насадку регенератора, проходить у ньому знизу нагору, нагріваючись при цьому до температури 1100 – 1150 °С. Далі повітря поступає через сполучені канали у вертикальні опалювальні канали, де відбувається змішування його з газом. Коксовий газ підводиться із газорозподільного каналу у печах з бічним підведенням опалювального газу або через дюзові канали в печах з нижнім підведенням коксового газу. Доменний газ підводять по сполучному каналі (косому хо-

ду) з регенератора. В опалювальних вертикальних каналах газу, змішуючись із повітрям, згоряють, а продукти горіння нагрівають вугілля, яке коксується [2].

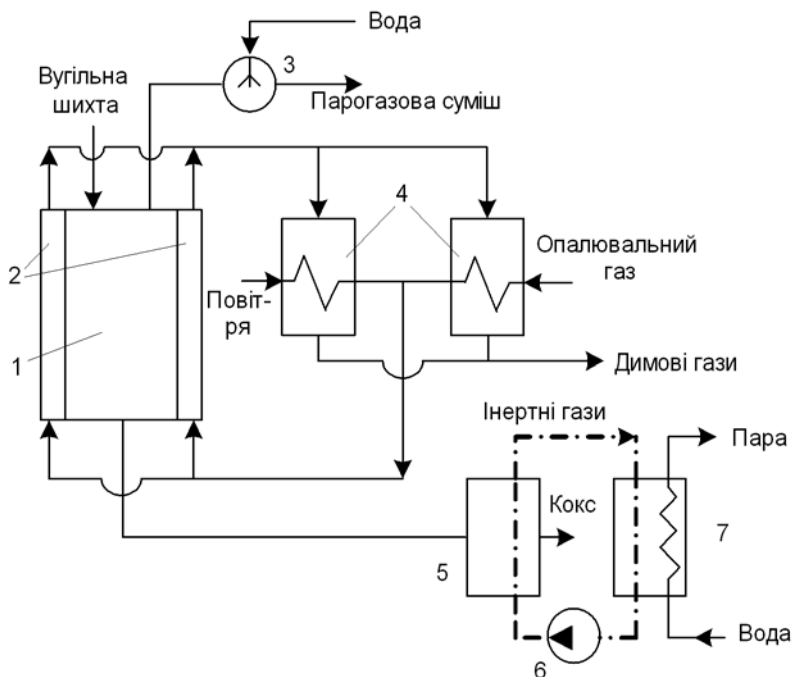


Рис. 2. Спрощена технологічна схема печі для виробництва коксу:
1 – камера коксування; 2 – обігрівальні простінки; 3 – збірник сирого
кокового газу; 4 – регенератори; 5 – камера сухого гасіння коксу;
6 – циркуляційна газодувка; 7 – котел-утилізатор

Насадкові камери регенераторів коксових печей мають прямокутну форму. Насадка регенераторів коксових печей викладається з вогнетривкої фасонної цегли з товщиною стінки 17 – 20 мм. У цеглині розташовані канали розміром $0,018 \times 0,1$ або $0,022 \times 0,107$ м. Для збільшення поверхні нагріву в нижній частині цегли та збоку виконані спеціальні виїмки, за рахунок чого поліпшується інтенсивність теплообміну в насадках. Окрім того, горизонтальні проходи сприяють рівномірному розподілу газів по перерізу насадкової камери регенератора.

Швидкість теплоносіїв у каналах насадки становлять 0,1 – 0,3 м/с. У цьому інтервалі швидкостей робота фасонної тонкостінної насадки майже не досліджувалася. Відзначимо, що регенератори коксових печей мають ряд істотних конструктивних особливостей, які обумовлені призначенням і характеристикою основних технологічних агрегатів. Насадка регенераторів в процесі експлуатації працює при циклічному переключенні регенератора з режиму нагрівання на режим охолодження.

Використання відомих методів розрахунку регенераторів базується на ряді припущень, які значно спрощують рішення складної задачі, але не враховують ряд факторів. Дана робота присвячена ство-

ренню уточненої методики розрахунку регенераторів коксових печей, що враховувала би їх конструктивні і технологічні особливості. Для цього було використано позитивний досвід досліджень, пов'язаних з математичним моделюванням теплообмінних процесів для регенераторів скловарних печей, та створенням дослідницьких програмних продуктів [8].

Автором розроблено алгоритм для розрахунку нестационарних температурних полів насадки і теплоносіїв з урахуванням конструктивних та експлуатаційних особливостей печей коксового виробництва. Для інженерної практики найбільший інтерес для розрахунку регенераторів представляють розподіл температур по висоті насадки і зміна температури теплоносіїв у каналах у циклі нагрівання-охолодження. Це дозволяє використати одновимірний спосіб описання і розрахунку теплообміну у каналах насадки при умові течії теплоносія зі сталими по перерізу каналу швидкістю і температурою, які можуть змінюватися лише у одному вимірі по довжині каналу насадки. У цьому випадку диференціальне рівняння теплопровідності з граничними умовами третього роду

$\alpha(x, \tau, t_{\text{ст}})(t_{\text{ст}} - t) = \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x}$ може бути представлено у вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right] = c(t) \rho(t) \frac{\partial t}{\partial \tau}. \quad (1)$$

Для регенератора коксової печі створено алгоритм розрахунку нестационарного поля температур насадки і теплоносіїв (газу або повітря) по висоті теплообмінника з використанням кінцево-різницевого методу елементарних теплових балансів. Розподіл температур по висоті насадки та значення величин теплового потоку визначався за допомогою рівнянь Ньютона-Ріхмана та Фур'є. Розрахунковим елементом був обраний вертикальний канал, утворений насадкою з кроком по висоті Δx , який створено по осям симетрії перерізу насадки. Було складено і вирішено систему енергобалансу для всіх розрахункових елементів $i = 1, 2, 3, \dots, n$ для кожного часового кроку j з інтервалом $\Delta \tau$ відповідно при заданій тривалості періодів нагрівання τ_1 і охолодження τ_2 вогнетривкої насадки:

$$\sum_{i=1}^n Q_{i,j}^k = \Delta I_i. \quad (2)$$

Ліва частина рівняння (2) є сумою теплових потоків $Q_{i,j}^k$ через усі поверхні обраного розрахункового елемента, а права частина характеризує зміну тепловмісту матеріалу насадки розрахункового елемента. Значення температури розрахункових елементів насадки по висоті для кожного кроку у часі знаходиться як:

$$t_{i,j+1} = t_{i,j} + A_1 \cdot [t_{i,j}^r - t_{i,j}] + A_2 \cdot [t_{i,j}^r - t_{i,j}] + A_3 \cdot [t_{i,j} - t_{i+1,j}]. \quad (3)$$

Температура димових газів у період нагрівання насадки визначається з рівняння теплового балансу:

$$t_{i+1,j}^r = t_{i,j}^r - B_i [t_{i,j} - t_{i,j-1}], \quad (4)$$

а температура повітря, що нагрівається, розраховується за формулою:

$$t_{i-1,j}^n = t_{i,j}^n + D_i \cdot [t_{i,j-1}^n - t_{i,j}]. \quad (5)$$

При цьому на кожному кроці для розрахунків використовувалися допоміжні коефіцієнти A_i, B_i, D_i , що враховують геометричні характеристики розрахункового елемента заданої висоти, зміну теплофізичних властивостей матеріалу і теплоносіїв, умови теплообміну між теплоносіями та поверхнею каналів.

Основним блоком обчислювального комплексу є блок визначення коефіцієнтів складного теплообміну в теплоакумуючих елементах насадки. В розрахунках регенератів коксових печей при використанні в насадці фасонної цегли значення коефіцієнтів конвективного теплообміну α_k знаходили за формулою [3]:

$$\alpha_k = (0,1185 + 0,2471 \cdot W / d^{0,6}) \cdot T_r^{0,25}, \quad (6)$$

де W – швидкість руху теплоносіїв в каналах насадки, м/с; d – гідравлічний діаметр, м; T_r – температура газів в насадці, К.

Значення коефіцієнту тепловіддачі випромінюванням $\alpha_{пр}$ в каналах можна отримати, застосувавши методику, розроблену Елгеті, яка використана в роботі [9], за формулою:

$$\alpha_{пр} = 5,67 \cdot \left[\bar{\epsilon}_r \cdot \left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \bar{a}_r \cdot \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right] / (T_r - T_{ст}). \quad (7)$$

У формулі (7) $\bar{\epsilon}_r$ та \bar{a}_r характеризують поглинальну здатність газу з урахуванням додаткового відбиття і поглинання стінкою. Для цього слід розрахувати еквівалентну товщину випромінюючого шару $L'_{эф} = L / \epsilon_{ст}^{0,85}$ ($\epsilon_{ст}$ – поглинальна здатність стінки, L – ефективна довжина променів). За відомими величинам температур газу T_r , стінки $T_{ст}$, а також добутку парціального тиску та еквівалентної товщини випромінюючого шару $pL'_{эф}$ розраховують поглинальну здатність ϵ' . Остаточне значення визначають за формулою $\bar{\epsilon} = \epsilon_{ст} \cdot \epsilon'$. Аналогічно можна знайти й величину \bar{a}_r . Наведений коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{нав}$, у якому враховувався вплив зміни температури газу та поверхні насадки безпосередньо після зміни режиму роботи регенератора, визначається за формулами:

$$\alpha_{\text{нав}} = (\alpha_k + \alpha_{\text{пр}}) / [1 + \text{Bi} \cdot (1/6 - 1/180 \cdot R)] \quad \text{для } R < 10;$$

$$\alpha_{\text{нав}} = (\alpha_k + \alpha_{\text{пр}}) / \left[1 + \text{Bi} \cdot \left(\frac{0,357}{\sqrt{0,3 - R}} \right) \right] \quad \text{для } R > 10, \quad (8)$$

де Bi – число Біо; коефіцієнт $R = \frac{b^2}{2a} \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right)$. Тут b – товщина стінки елемента насадки, м; a – коефіцієнт теплопровідності насадки, $\text{м}^2/\text{с}$.

У роботах [7, 8] описані характерні особливості реалізації математичної моделі регенератора. Перевірка збіжності чисельного рішення виконувалась шляхом порівняння різниці кількості акумульованої насадкою регенератора теплоти в поточному та попередньому розрахункових циклах.

Основними результатами розрахунку регенератора є інформація про зміну температурного стану акумулюючої насадки регенератора в циклі нагрів-охолодження, значення про динаміку зміни температур димових газів і повітря по висоті насадки в процесі роботи регенератора, дані про інтенсивність теплообміну конвекцією та випромінюванням. Деякі результати моделювання роботи регенеративного теплообмінника коксової печі представлено на рис. 3 і в табл. 1.

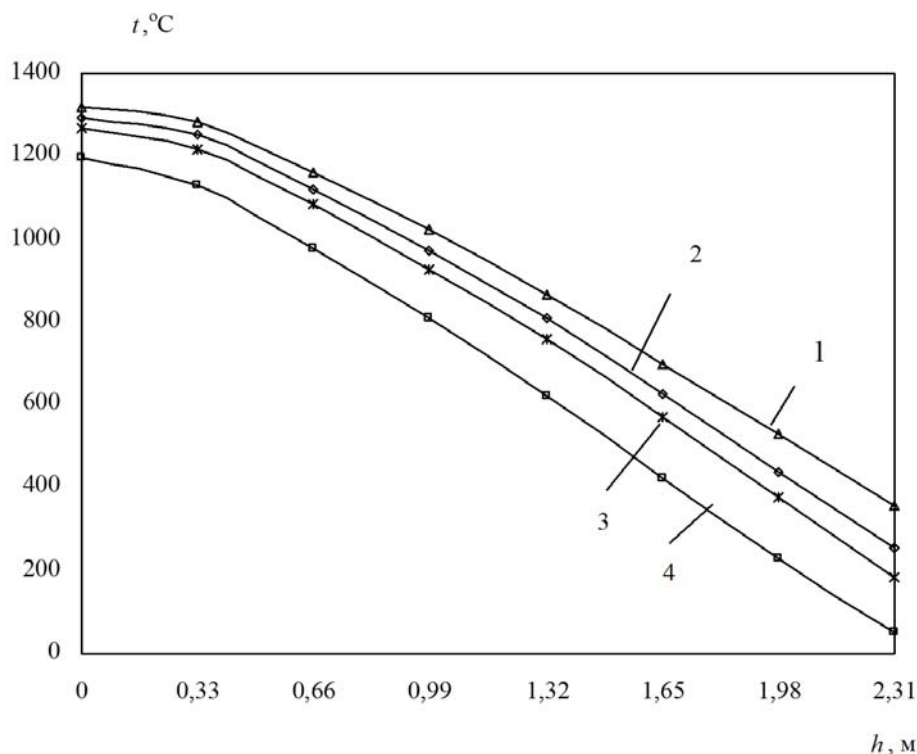


Рис. 3. Розподіл температур по висоті регенератора коксової печі в циклі нагрів-охолодження: 1, 2 – димових газів та насадки наприкінці періоду нагріву; 3, 4 – температури повітря, що гріється, та насадки в період охолодження

Розрахунки проводилися при наступних умовах: кількість димових газів на один регенератор $V_r = 0,348 \text{ м}^3/\text{с}$; кількість повітря, що нагрівається $V_{\text{пов}} = 0,306 \text{ м}^3/\text{с}$; тривалість періодів нагріву і охолодження $\tau = 1200 \text{ с}$; температура димових газів на вході в регенератор $t_r = 1320 \text{ }^\circ\text{C}$; температура холодного повітря на вході в насадку регенератора $t_{\text{пов}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Насадка – фасонна цегла з поверхнею нагріву $0,488 \text{ м}^2$. Висота насадки – 2,31 м. Швидкість димових газів складає $W_r = 0,122 \text{ м/с}$, повітря – $W_{\text{пов}} = 0,107 \text{ м/с}$. Температура повітря на вході – $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблиця 1

Теплотехнічні показники роботи регенератора коксової печі

Тем-ра димових газів на вході, $t'_r, \text{ }^\circ\text{C}$	Тем-ра газів на виході наприкінці циклу, $t''_r, \text{ }^\circ\text{C}$	Середня тем-ра димових газів за цикл, $\bar{t}_r, \text{ }^\circ\text{C}$	Тем-ра повітря на виході наприкінці циклу, $t''_{\text{пов}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Середня тем-ра повітря за цикл, $\bar{t}_{\text{пов}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Кількість теплоти, що передається за цикл, $Q_{\text{пов}}, \text{ МДж}$
1320	375	326	1196	1212	6143

Результати моделювання регенератора коксової печі при заданих параметрах дають повне уявлення про теплові режими, включаючи розподіл температур в насадці та теплоносіїв, зміну їх за цикл, кількість теплоти, що передається в регенераторі, тощо. Отримані дані можуть бути використані в системах автоматичного управління, при виборі енергоефективних режимів роботи регенераторів, оптимізації їх параметричних характеристик.

Висновки

Таким чином, обґрунтовано використання методів математичного моделювання для проведення досліджень процесів теплообміну в теплоакumuлюючих елементах насадки регенераторів печей коксохімічного виробництва

Розроблено математичну модель для розрахунків процесів нестационарного теплообміну в регенераторах насадок коксових печей з урахуванням їх конструктивних і експлуатаційних характеристик, отримано розрахункові дані, які можна використовувати для діагностики та вибору ефективних режимів роботи регенераторів.

Список літератури

1. Стратегія енергозбереження в Україні: аналітично-довідкові матеріали в 2-х т. / За ред. В. А. Жовтянського, М. М. Кулика,

Б. С. Стогнія. — К. : Академперіодика, 2006. — Т. 1 : Загальні засади енергозбереження. — 510 с.

2. Кауфман А. А. Технология коксохимического производства / А. А. Кауфман, Г. Д. Харлампович. — Екатеринбург: ВУХИН-НКА, 2004. — 287 с.

3. Расчеты коксовых печей и процессов коксования с применением ЭВМ // [И. В. Вирозуб, Н. С. Ивницкая, Р. Е. Лейбович и др.]. — К. : Вища школа, 1989. — 304 с.

4. Ключников А. Д. Энергетика теплотехнологии и вопросы энергосбережения / А. Д. Ключников. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 128 с.

5. Гребенюк А. Ф. О методах расчета регенераторов коксовых печей / А. Ф. Гребенюк, Д. А. Коваленко // Угলেখимический журнал. — 2007. — № 1 — 2. — С. 56 — 60.

6. Васильев Ю. С. К вопросу тепловой работы насадки регенераторов коксовых печей / Ю. С. Васильев // Кокс и химия. — 1967. — № 1. — С. 18 — 25.

7. Кошельник А. В. Математическая модель многокамерных регенераторов плавильных агрегатов / А. В. Кошельник // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2007. — № ½ (25). — С. 51 — 54.

8. Интегрированные энергосберегающие теплотехнологии в стекольном производстве : монография / [Л. Л. Товажнянский, В. М. Кошельник, В. В. Соловей, А. В. Кошельник]. — Х. : НТУ «ХПИ», 2008. — 628 с.

9. Кошельник О. В. Особливості розрахунків процесів складного теплообміну в регенеративних теплообмінниках з нерухомою вогнетривкою насадкою нагрівальних і плавильних печей / О. В. Кошельник // Промышленная теплотехника. — Т. 30, № 3. — 2008. — С. 33 — 40.

Рукопис надійшов 19.01.2012 р.